

工業用書

玻璃製造學

森谷太郎 成瀬省
功刀職長 田代仁

編集

邱振麟 譯

玻璃製造學

版權所有



翻印必究

中華民國七十年五月修訂二版
中華民國七十三年三月修訂三版

全冊平裝 450元 全冊精裝 490元

著者：~~一~~ 森谷太郎 成瀬省
功刀雅長 田代仁 編集
編譯者： 邱 標 麟

發行者： 吳 主 和

發行所： 旗 文 書 局

地址：臺南市東門路421巷28號

門市：台南市林森路二段63號

電話：(062)2370003·2386937

郵政劃撥帳戶32104號

No.28, LANE421 DONG-MEN

ROAD TAINAN TAIWAN REPUBLIC
OF CHINA

TEL:(062)2370003.2386937

本書局經行政院新聞局核准登記發給
出版事業登記證局版台業字第0370號

序

玻璃之美反映人心，人類研究其製造加工法已歷數千年的歲月。隨著文化的進步，人們認識其透明性的實用價值，製造窗玻璃；又隨著物理學的發展，究明其光學性質，發明窺伺極微世界的顯微鏡和視野無邊的望遠鏡，滿足人類探討未知境界的慾望，用於照明用具後，驅逐黑夜，增加活動時間的自由性，達成更稱心的環境。玻璃優秀的化學耐久性，在理化用玻璃、醫療器材用玻璃等容器玻璃方面大有貢獻。

不論現在或是將來，玻璃對人類文化的發展必繼續參與和貢獻。

有關玻璃科學、技術的研究與其他分野相呼應，相伴急速進步，特別是玻璃構造理論與基礎性質的研究。放射線所致玻璃特性、玻璃結晶化的變化研究、組成研究等促成玻璃的新發見，使最近的進步更顯著，在如此急速進步的途中，急需最新的專書供參考，本手冊的編輯宗旨剛好為玻璃的技術者、研究者、使用者提供最完善的資料；由森谷太郎、功刀雅長、田代仁、成瀬省等人企劃，執筆者都是日本玻璃技術、研究界的頂尖人物，在此對各位先生的協力合作表示最大的謝意；本書迎合發展途中的急切需要，內容也慮及將來的進展，應足可供讀者愛不釋手。

最後，在發行之際，特別向贊助印行的出版社致謝

1978年11月

森谷太郎

功刀雅長

成瀬 省

田代 仁

第一篇 玻璃之概念及構造	1
1. 玻璃之概念	1
1.1. 玻璃是何物	1
1.2. 玻璃狀態與轉移溫度	1
2. 玻璃之構造	2
2.1. 玻璃之構成要素及其形成	2
2.2. 諸家對玻璃之構造的理論	6
3. 玻璃之轉移現象	12
3.1. 轉移溫度、轉移域	12
3.2. 於轉移域之工學的諸特性溫度	13
3.3. 假想溫度 (Fictive temperature)	13
3.4. 由玻璃微相說 (Micro-phase theory) 之轉移現象	15
3.5. 於轉移域之折射率變化	17
3.6. 除氈現象	18
3.7. 粘彈性現象	21
4. 玻璃生成反應	24
4.1. 前言	24
4.2. 玻璃生成之過程	24
4.3. 呈顯於玻璃生成過程中的諸現象	26
5. 玻璃化範圍	31
5.1. 關於玻璃化範圍之一般的法則	32
5.2. 玻璃化範圍之實測例	35
第二篇 玻璃之性質以及測定法	53
1. 玻璃之黏性、彈性	53
1.1. 測定法	53
1.2. 玻璃之溫度特性	59
1.3. 玻璃之時間特性	61
1.4. 化學組成及玻璃之特性	65
1.5. 動的黏彈性	68

2 目 錄

2 表面張力	71
2.1. 表面張力	71
2.2. 測定法	73
2.3. 玻璃之表面張力	74
3 密度	80
3.1. 密度之定義及計算法	80
3.2. 密度之測定法	81
3.3. 由於浮遊法之密度差之精密測定	83
3.4. 由於遠心分離法之密度差之測定	87
3.5. 組成與密度之關係	88
3.6. 於高溫之玻璃之密度	96
3.7. 由於熱處理之玻璃之密度變化	99
3.8. 浮遊法之品質管理之應用	110
4 光學之性質	113
4.1. 反射、吸收	113
4.2. 折射、分散	116
4.3. 散亂	121
5 對於放射線之性質	122
5.1. 放射線與玻璃之相互作用	122
5.2. 由於放射性之玻璃之著色	126
5.3. 由於 γ 線之著色以外之物理的性質之變化	132
5.4. 由中子之照射效果	134
6 電氣之性質	134
6.1. 體積阻抗率	135
6.2. 表面張力	139
6.3. 導電特性	141
6.4. 絕緣耐力	153
7 磁氣(力)的性質	156
7.1. 磁氣(力)共鳴的原理	156
7.2. 磁氣共鳴吸收之在玻璃上之應用	158
8 熱的性質	160
8.1. 熱容量以及比熱	160
8.2. 熱傳導率	161
8.3. 熱膨脹	163

8.4. 耐熱性	172
9. 機械的性質	175
9.1. 彈性	175
9.2. 硬度	181
9.3. 玻璃之強度	184
10. 化學的性質	200
10.1. 概要	200
10.2. 玻璃的化學的耐久性的試驗法	202
10.3. 對於玻璃之化學耐久性之玻璃組成之影響	207
10.4. 影響化學的耐久性之諸因子	218
10.5. 玻璃表面的化學的性質	221
10.6. 玻璃之侵蝕機構	227
11. 結晶析出	232
11.1. 概要	232
11.2. 玻璃系之相平衡	233
11.3. 結晶生成之理論	243
11.4. 液相溫度、結晶化速度的測定法	248
11.5. 玻璃組成和結晶化之關係	250
11.6. 由於添加結晶核形成劑之結晶化	253
11.7. 實用玻璃中之析出結晶的確認	256
12. 分 相	258
12.1. 概要	258
12.2. 氟化玻璃之分相	258
12.3. 硼酸鈉玻璃之分相	259
12.4. PbO-SiO_2 系玻璃之分相	262
12.5. $\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}$ 系玻璃之分相	262
12.6. 實用硼矽酸玻璃之分相	266

第三篇 玻璃之製造 270

1. 原料	270
1.1. 概要	270
1.2. 主原料	270
1.3. 著色劑	278

4 目 錄

1.4. 乳白劑.....	282
1.5. 氧化劑、溶解促進劑、澄清劑.....	282
1.6. 特殊玻璃用原料.....	285
1.7. 原料之選擇.....	286
1.8. 乾燥、粉碎以及篩別.....	287
1.9. 原料之收納和貯藏.....	291
2 調整以及Batch處理	294
2.1. 概要.....	294
2.2. 調製計算.....	294
2.3. Batch 之調製.....	298
2.4. Batch 之輸送以及投入.....	304
3 熔 融	305
3.1. 燃料.....	305
3.2. 燃燒.....	312
3.3. 玻璃之熔融.....	324
3.4. 耐火物和其熔融.....	346
3.5. 電氣熔融.....	361
4 成形以及成形機械	369
4.1. 人工成形法 (Artificial forming)	370
4.2. 機械成形法 (Mechanical forming)	371
5 關於玻璃之緩冷卻	384
5.1. 玻璃之緩冷操作.....	384
5.2. 關於玻璃之扭歪原理.....	385
5.3. 關於緩冷卻操作之重點.....	387
5.4. 緩冷窯.....	393
5.5. 關於最近之緩冷窯.....	399
6 生於玻璃之缺點	399
6.1. 玻璃素地之缺點.....	399
6.2. 玻璃成形上之缺點.....	415
7 自動控制設(Automation)	418
7.1. 設置自動控制設備之場合之注意事項.....	418
7.2. 設備在Glass tank窯之自動控制的分類.....	420
7.3. 關於自動控制計器.....	421
7.4. 控制名論.....	421

7.5. 關於計器板之裝置	430
8. 統計的方法之應用	430
8.1. 概要	431
8.2. 度數分布和統計圖	431
8.3. 計量值之推定和檢定	434
8.4. 計算值之推定和檢定	442
8.5. 相關分析以及回歸分析	448
8.6. 依二項著然率紙之簡易分析	453
8.7. 管理圖	454
8.8. 實驗計劃法	459
8.9. 其他之統計的方法之應用	467

第四篇 玻璃之加工 469

1. 玻璃之熱加工	469
1.1. 概要	469
1.2. 由於加熱而玻璃之性質的變化	469
1.3. 用於玻璃之加工的瓦斯和噴灯	471
1.4. 玻璃細工	476
1.5. 玻璃之熱加工體之強度	480
1.6. 玻璃的火焰加工機械	482
1.7. 玻璃之用電熱加工	494
1.8. 用於電熱加工之發熱體	494
1.9. 由於間接加熱之電熱加工	496
1.10. 高週波加工	498
1.11. 電弧加工	499
1.12. 結論	500
2. 封 著	500
2.1. 封著體應具備之性能	501
2.2. 支配封著體之安定性的諸因子	502
2.3. 支配封著體的氣密性之諸因子	504
2.4. 封著用玻璃之應具備的性質	506
2.5. 封著用玻璃之主要性質	507
2.6. 封著體玻璃之壓力分布	512

6 目 錄

2.7. 外表之粘著溫度.....	519
2.8. 於封著技術上有用之其他事項.....	520
2.9. 封著用玻璃和金屬之實例.....	525
3. 板玻璃的熱加工.....	542
3.1. 序言.....	542
3.2. 強化加工.....	543
3.3. 彎曲加工.....	551
3.4. 複層處理.....	554
3.5. 合併加工.....	557
4. 工藝玻璃之加工.....	559
4.1. 切削 (Cutting)	559
4.2. 雕刻 (Engraving, Gravieren)	565
4.3. 噴砂 (Sand-blasting)	569
4.4. 其他之加工法.....	571
5. 其 他.....	573
5.1. Printing.....	573
5.2. Coating	582
5.3. Etching (雕刻術)	588
5.4. Staining.....	591
第五篇 玻璃各論.....	593
1. 古代玻璃	593
1.1. 序言.....	593
1.2. 西洋之玻璃.....	593
1.3. 中國以及日本之玻璃.....	595
2. 板玻璃	597
2.1. 製造方法.....	597
2.2. 各種之板玻璃.....	599
3. 容器玻璃	601
3.1. 容器玻璃之種類.....	601
3.2. 容器玻璃之組成.....	603
3.3. 容器玻璃一般的尺寸、尺寸公差.....	608
3.4. 容器玻璃之試驗方法.....	611
4. 工藝玻璃	613
4.1. 關於工藝玻璃.....	613

4.2. 組成以及原料調合	614
4.3. 熔融以及成形	617
4.4. 工藝玻璃之實例	625
5. 理化學用玻璃	626
5.1. 概要	626
5.2. 石英玻璃	630
5.3. 高矽酸玻璃	638
5.4. 硼矽酸玻璃	645
5.5. 無鹼玻璃 (鉛鈣酸鹽玻璃)	648
5.6. 溫度計用玻璃	649
6. 電氣用玻璃	652
6.1. 管球用玻璃	652
6.2. 管球用玻璃之性質	660
6.3. 管球用玻璃之各種的表面處理	665
6.4. 透明導電皮膜	665
6.5. 真空成形法	667
6.6. 燒結玻璃法	668
6.7. 用高周波加工	668
6.8. 低熔點焊藥玻璃	669
6.9. 使用於管球用管內零件的玻璃	670
6.10. 半導體素子之構造材料	671
6.11. 作為電路素子之用途	672
6.12. 作為電路支持體之用途	673
6.13. 電場發光用材料	674
6.14. 在重量方面之用途	674
6.15. 電波透過用材料	676
6.16. 發熱用玻璃材料	677
7. 玻璃纖維	677
7.1. 概要	677
7.2. 玻璃纖維之組成和性質	678
7.3. 玻璃纖維之製法	681
7.4. 玻璃纖維製品	685
7.5. 用途	687
7.6. 耐熱纖維 (Refractory fiber)	688

8 目 錄

11. 纖維光學 (Fiber Optics)	689
8. 光學玻璃	690
8.1. 光學玻璃之特性和分類	690
8.2. 光學玻璃之組成	692
8.3. 光學玻璃之製造	697
8.4. 光學玻璃製品之規格	706
8.5. 新種光學玻璃	710
9. 玻璃電極	714
9.1. 基於玻璃電極之 PH 測定	714
9.2. 電極用玻璃之 PH 應答之原因	716
9.3. 電極用玻璃之製法和組成	717
9.4. Na 應答性玻璃電性	721
10. 著色玻璃	722
10.1. 概要	722
10.2. 由於有色離子之著色	725
10.3. 由金屬膠體的著色	728
10.4. 由於金屬以外之膠體著色	731
10.5. 由於放射線的著色	739
10.6. 在玻璃表面的著色	740
10.7. 玻璃的著色和著色劑	741
11. 感光性玻璃	753
11.1. 在感光性玻璃的貴金屬膠體的生成機構	753
11.2. 感光性玻璃的處理條件	755
11.3. 感光性玻璃的種類	758
12. Devitroceramics (結晶化玻璃)	764
12.1. 概要	764
12.2. 結晶化玻璃的製造法	765
12.3. 玻璃的基礎組成	771
12.4. 析出結晶相	774
12.5. 結晶化玻璃的性質	775
12.6. 結晶化玻璃的原料	791
12.7. 結晶化玻璃的應用	791
13. 濾光鏡用玻璃	792
13.1. 一般攝影用濾光鏡 (Filter)	792

13.2. 特殊濾光鏡 (Filter)	795
13.3. Filter glass 的顏色	798
13.4. 顏色的表示方法	799
13.5. 關於有色 Filter Glass 的熔解	804
14. 放射線用玻璃	810
14.1. 放射線遮蔽玻璃	810
14.2. 放射線線量計玻璃	818
15. 泡沫玻璃	821
15.1. 概要	821
15.2. 製造法	822
15.3. 性質	823
15.4. 使用方法	825
16. 電導性玻璃	830
16.1. 施以透明導電性皮膜的玻璃	830
16.2. 電子傳導性玻璃	840
17. 特殊玻璃	846
17.1. 氧化物係特殊玻璃	847
17.2. Chalcogen 化物系特殊玻璃	859
17.3. 鹵化物係特殊玻璃	861
18. 照明用玻璃	862
18.1. 照明用光源和玻璃	864
18.2. 照明和玻璃	870
19. Glassling	872
19.1. 製法	873
19.2. 性質以及試驗方法	876
19.3. 和藥的剝離和處理上的注意	878
19.4. 玻璃鋼管	879
19.5. 結晶化Glassling	879
20. 醫療用玻璃	879
20.1. 眼鏡用玻璃	879
20.2. Ampoule glass (安瓿玻璃)	881
20.3. 體溫表用玻璃	883
20.4. 注射筒玻璃	884
20.5. 紫外線透過玻璃	885

第一篇 玻璃之概念及構造

1 玻璃之概念

1.1 玻璃是何物

多數之液體經冷卻時於一定之溫度下就凝固變成結晶體。但是某種之液體經冷卻就逐漸增加其粘性，不在一定之溫度下凝固而益增加其粘性，最後不行結晶而成為硬的固形物。如此之物質由常溫加熱時就隨即軟化再變為凝體，而不表示結晶物質之一定熔點。如此之非結晶性的凝固物即稱謂玻璃狀態 (Glassy state)，具有如此狀態之物質即稱謂玻璃 (Glass)。

有機物，無機物均有如此類之物質。是故廣義而言之，即包括有機玻璃及無機玻璃之全領域之意味，此兩者均具有共同之性質之處，又因性質之種類也有相當差異之點。

又欲得如此之玻璃狀態時未必須由液體開始而行冷卻，某種物質例如酒精者即由氣體直接冷卻時可得玻璃狀態。

1.2 玻璃狀態與轉移溫度

欲使玻璃狀態與一般之固體及液體之關係能明瞭起見，須思慮某一物理的性質例如體積，這就是觀察對溫度能呈何種之變化。如圖 1.1，冷卻於最初高溫度為液體之狀態 L 時，其體積就沿着 LM 而減少之，於其物質之凝固點 T_f 之溫度下體積就如 MM' 之急速地減少之，同時行固化而變成結晶狀態。繼續降低溫度時體積就沿着 M'S 而減少之。這是一般之結晶質物體之因溫度變化而體積又變化之典型的樣相。但在玻璃之場合時，由液體之狀態 L 起因溫度之降低同時體積也就沿着 LM 而減少，到達 M 時也不會呈現如 MM' 之急烈在體積變化，沿着 LMK 而變化之，同時液態之粘性就益增大而通過 K，再沿着 KG 而減少體積，不呈結晶質而到達玻璃狀態。

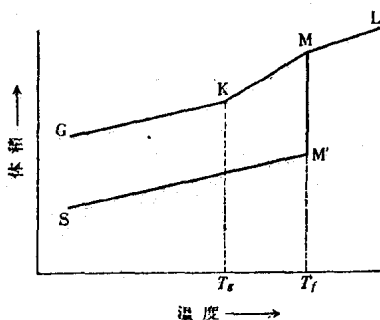


圖 1.1 “玻璃狀態、固體、液體間的關係”

此際到相當於 T_g 之溫度以下時，其物質就變為硬而脆之狀態，其粘性係數就呈 10^{14} poise 以上之值，而體積變化率也變小之。具有如此之性質對於溫度之急烈變化之點 K 來說，因一切均呈顯為玻璃之物質之故，此即稱謂玻璃之「轉移點」，對於此際之溫度 T_g 就稱謂「轉移溫度」。

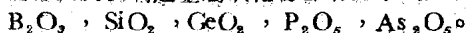
2 玻璃之構造

2.1 玻璃之構成要素及其形成

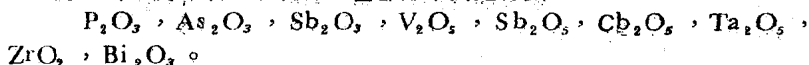
在此以關於無機玻璃之構造為主而闡述之，其中就以最重要之氧化物玻璃而說明之。

2.1.1 玻璃形成之氧化物

在多數之氧化物中，有可得呈玻璃狀態者，與可呈結晶狀態而不變為玻璃者。特別是易變為玻璃之金屬氧化物即有如下列之物質。



此外可成為玻璃之氧化物，也即如下列之物質。



關於這些氧化物可成為玻璃之條件，為次項之 Zachariasen 之玻璃形成條件。

2.1.2 Zachariasen 之玻璃形成條件

Zachariasen 說，玻璃之會生成，是因其構成原子 (M) 或離子必須滿足以下之四個條件。

- (1) 一個氧原子是不與二個以上之陽原子 (M) 連結。
- (2) 包圍陽原子 (M) 之氧原子數通常是很少，為 3 或 4。
- (3) 以陽原子為中心之氧多面體，係相互地用其角隅連結，不共有其稜線或面。而構成 3 次元之網狀組織 (Network)。
- (4) 氧多面體至少也各用 3 個之角隅來連結。

2.1.3 玻璃形成氧化物 (Glass Forming oxides), N.W.P (Network Former)

形成玻璃之氧化物被認為應必須具備前項之條件。在此，滿足此條件而被認為具有玻璃之形成能力之氧化物，即稱謂玻璃形成氧化物，又其氧化物之陽原子稱為 Network，或 N, W, F。

2.1.4 修飾 (Network-modifier, N.W.M)

如 Na_2O , K_2O , CaO , BaO 等之氧化物，是不適合 Zachariasen 之玻璃形成條件，故單獨時不能變成玻璃，但與玻璃氧化物成某一程度之混合比而熔融

時，則生成玻璃。如此之氧化物其本身雖不能形成玻璃，而與玻璃形成氧化物作適當地配合時即可使玻璃化，而能在其玻璃賦與適當之性質之氧化物即稱謂網狀修飾氧化物或 Network-modifier，略稱 N.W.M。

2.1.5 中間氧化物 (Intermediate oxide)

氧化物雖有玻璃形成氧化物及修飾氧化物，但也有具中間的性質之氧化物，此即稱為中間氧化物 (Intermediate oxide)。如 BeO , Al_2O_3 , Zn_2O_3 , Fe_2O_3 等屬之。

2.1.6 陽離子與氧氣之結合強度

氧化物之會成為玻璃形成氧化物，或修飾氧化物，或中間氧化物之如此之概念，可視為其氧化物之陽離子與氧之結合強度有關係。結合之強度可將其氧化物之解離能用配位數來除之數值表示之。Sun 氏也就將玻璃形成氧化物，修飾氧化物，中間氧化物及其與氧化物之結合之強度整理如下表 (表 2.1)。

表 2.1 對於氧化物結合的強度

MOx中的M	原子價	解離能 E_d (MO_2 關於 1 k, cal)	配位數	單結合的強度 (k, cal)	MOx中的M	原子價	解離能 E_d (MO_2 關於 1 k, cal)	配位數	單結合的強度 (k, cal)
B	3	356	3	119	Y	3	393	8	50
Si	4	424	4	106	Sn	4	278	6	46
Ge	4	431	4	108	Ga	3	267	6	45
Al	3	402~317	4	101~79	In	3	259	6	43
B	3	356	4	89	Th	4	516	12	43
P	5	442	4	111~88	Pb	4	232	6	39
V	5	449	4	112~90	Mg	2	222	6	37
As	5	349	4	87~70	Li	1	144	4	36
Sb	5	339	4	85~68	Pb	2	145	4	36
Zr	4	485	6	81	Zn	2	144	4	36
Ti	4	435	6	73	Ba	2	260	8	33
Zn	2	144	2	72	Ca	2	257	8	32
Pb	2	145	2	73	Sr	2	256	8	32
Al	3	317~402	6	53~67	Cd	2	119	4	30
Th	4	516	8	64	Na	1	120	6	20
Be	2	250	4	63	Cd	2	119	6	20
Zr	4	485	8	61	K	1	115	9	13
Cd	2	119	2	60	Rb	1	113	10	12
Sc	3	362	6	60	Hg	2	68	6	11
La	3	406	7	58	Cs	1	114	12	10

2.1.7 玻璃形成氧化物之原子結合性及離子結合性

在構成氧化物之陽原子及氧之化學結合上，就有具有由於電子對之結合之「原子結合」之性質之物質，及具有由於正負之電荷之間之庫侖力 (Coulomb Powder) 「離子結合」之性質之物質。依氧化物之種類而有原子結合性大的物質，及離子結合性大的物質，但也有具其中間的兩性物。Pauling 氏就對化合物之化學結合性，離子結合性之比例提出表示方法。即構成化合物之兩原子之電氣的陰性度 (Electronegativity) 之差之函數也可以用作表示其化合物之離子結合性之比例。

欲知形成玻璃之氧化物到底具有何等之比例的離子結合性仍是有深深地意味。原子結合性強之化合物，或離子結合性強之化合物在一般均不能成為玻璃形成之化合物。能成為玻璃形成之化合物者，為離子結合性之比例在40~50%左右之場合才會有。利用於玻璃之氧化物之「電氣陰性度之差」及「離子結合性之比例(%)」用表來表示時，即如下列之表(表2.2)。

表 2.2 氧化物之電氣陰性度之差和離子結合性

結 合	電氣陰性度之差 ($X_Y - X_M$)	離子結合性 (%)	結 合	電氣陰性度之差 ($X_Y - X_M$)	離子結合性 (%)
B-O	1.5	42	Sc-O	2.2	65
As-O	1.5	42	Mg-O	2.3	70
Si-O	1.7	50	Ca-O	2.5	75
Sb-O	1.7	50	Sr-O	2.5	75
Ge-O	1.8	55	Li-O	2.5	75
Sn-O	1.8	55	Ba-O	2.6	80
Ti-O	1.9	56	Na-O	2.6	80
Zr-O	1.9	56	Rb-O	2.7	81
Be-O	2.0	60	K-O	2.7	81
Al-O	2.0	60	Cs-O	2.8	82
Y-O	2.2	65			

2.1.8 架橋氧原子 (Bridging oxygen atom)

係玻璃形成氧化物之代表物質，即為 SiO_2 。所謂 SiO_2 玻璃者，即以 Si 原子為中心之四面體之頂點位置，被四個 O 原子圍繞構成 SiO_4 四面體，而其 SiO_4 四面體連結於 2.1.2 而滿足 Zachariasen 之諸條件，而構成玻璃的物質。例如兩個之 SiO_4 四面體連結時，即如圖 2.1 之平面的圖例表示之。

如圖已知係由兩個之 Si 原子及 7 個之 O 原子連結而成的，雖是如此，成 4 之 O 原子是在兩個 Si 原子之中間，作為兩個 Si 原子之橋樑的功用。

如此在兩個玻璃形成陽原子 Si 之中間而直接與 Si 連結之氧即稱謂架橋氧 (Bridging oxygen)。而此之用氧直接連結在玻璃形成之陽離子間之這個連結，即稱為氧橋 (Oxygen Bridge)。

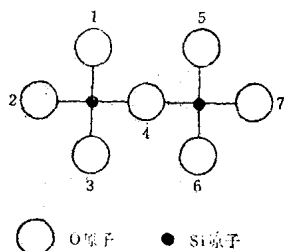
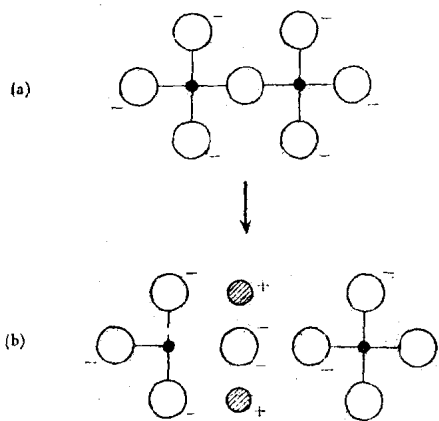


圖 2.1 2 個之 SiO_4 四面體的連結

2.1.9 非架橋氧原子 (Non bridging oxygen atom)

對在兩個 Si 原子之中間的結合氧即稱為架橋氧 (Bridging oxygen) 而言，氧之一個結合是與如 Si 之玻璃形成之陽離子連結，另外之一個結合是與如修飾氧化物之陽離子 Na 等作靜電結合時，此氧即稱為非架橋氧 (Non bridging oxygen)。

於 SiO_2 中若導入 Na_2O 時 Na^+ 就打破 SiO_2 之氧素橋，而將架橋氧變為非架橋氧，而與此作靜電的結合。圖 2.2 為表示其樣式之圖示。



2.1.10 修飾氧化物之導入及玻璃形成之界限

於玻璃形成之氧化物中逐漸導入修飾氧化物時，即以玻璃形成陽離子為中心之氧多面體就逐漸在增加非架橋氧氣原子數。依此而玻璃之構造就逐漸地成為開放的形式。例如 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 系玻璃，當 Na_2O 之量增加時，粘性就因此而降低之。若 Na_2O 之量再增大時，即玻璃形成就成為困難，最後無論怎樣地冷卻也就不能達到呈玻璃化之界限。關於此問題，Stevens 氏就闡述如下之關係出來。若玻璃形成之離